

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И  
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 12%-НОЙ ХРОМИСТОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ  
СТАЛИ ЭК-181**

Д.А. Кравченко, Н.А. Полехина

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент И.Ю. Литовченко

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [kravcdasha@yandex.ru](mailto:kravcdasha@yandex.ru)

**INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND  
MECHANICAL PROPERTIES OF 12% -CR FERRITIC-MARTENSITIC STEEL EK-181**

D.A. Kravchenko, N. A. Polekhina

Scientific Supervisor: PhD. I.Yu. Litovchenko

Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: [kravcdasha@yandex.ru](mailto:kravcdasha@yandex.ru)

**Abstract.** *The features of microstructure and mechanical properties of the EK-181 ferritic-martensitic steel after high-temperature thermomechanical treatment with deformation in the austenite region are investigated. It is shown that as a result of the treatment, the volume fraction of nanosized vanadium carbonitride particles  $V(C, N)$  and the dislocation density increase significantly. This modification of the structure leads to an increase in the yield strength of the steel up to 468 MPa at 650 °C.*

**Введение.** Одним из приоритетных направлений реакторного материаловедения является разработка малоактивируемых 12%-ных хромистых ферритно-мартенситных сталей, для использования их в качестве материалов активных зон и внутрикорпусных устройств ядерных и термоядерных энергетических реакторов новых поколений [1–3]. Для расширения рабочего температурного диапазона таких сталей, во-первых, необходимо дополнительное повышение их высокотемпературной прочности, во-вторых, снижение температуры вязко-хрупкого перехода.

Одним из способов повышения прочности сталей является высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО), которая включает деформацию в аустенитной области. В настоящей работе исследовано влияние ВТМО на особенности микроструктуры и механические свойства стали ЭК-181 (RUSFER-EK-181).

**Материалы и методы исследования.** Исследования проводили на образцах жаропрочной ферритно-мартенситной 12%-ных хромистой стали ЭК-181 (Fe-11.17%Cr-1.13%W-0.74%Mn-0.25%V-0.16%C), ВТМО заключалась в нагреве до  $T = 1100$  °C с выдержкой 1 ч., горячей пластической деформации прокаткой до величины  $\varepsilon \approx 30 - 60$  % (прокатный стан находился при комнатной температуре; температура образца на выходе из стана была не ниже  $\approx 650$  °C) и последующей закалке в воду.

Механические испытания на растяжение проводили при  $T = 20$  °C, а также при  $T = 650$  °C в вакууме  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  Па. Образцы имели форму двусторонних лопаток с размерами рабочей части

~ 13×2×1 мм. Структурные исследования проводили на просвечивающем электронном микроскопе Philips CM12 при ускоряющем напряжении 120 кВ. Фольги для просвечивающей электронной микроскопии готовили методом электролитической полировки в растворе хромового ангидрида CrO<sub>3</sub> в ортофосфорной кислоте H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

**Результаты.** Электронно-микроскопические исследования показали формирование высокой плотности наноразмерных (5-10 нм) частиц карбонитрида ванадия V(C, N) (рис. 1) непосредственно после ВТМО. Указанные частицы образуются в аустенитной фазе, так как их выделение в температурном интервале существования мартенсита (ниже ~ 400 °С) невозможно. В условиях традиционной термической обработки (ТТО – закалка и отпуск) эти частицы формируются в процессе отпуска (720 °С, 3ч). Отпуск после ВТМО приводит к коагуляции наночастиц карбонитрида ванадия V(C, N) и некоторому уменьшению их плотности, тем не менее, их размеры не превышают ~ 10 нм (рис. 2). Более высокая степень деформации ( $\varepsilon \approx 60\%$ ) способствует повышению плотности дислокаций и наноразмерных частиц V(C, N) в мартенситной структуре. Значительная плотность дефектов и выделившихся на них наноразмерных частиц сохраняется и в процессе отпуска (720 °С, 1ч).

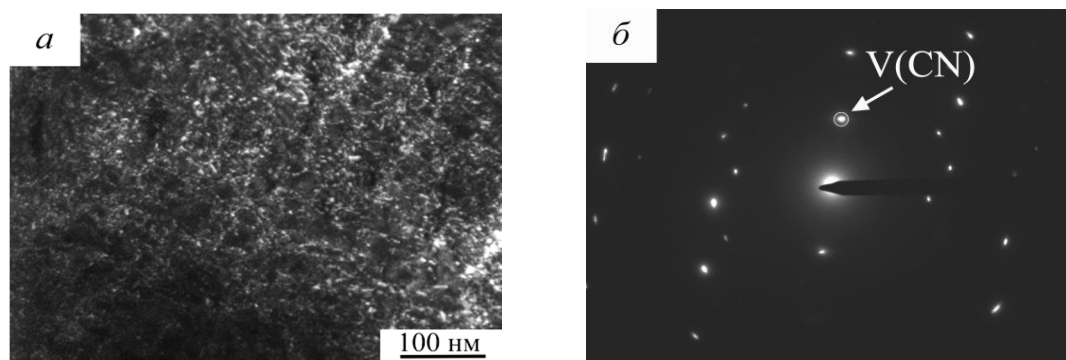


Рис. 1. Темнопольное изображение в рефлексе карбонитрида V(C, N) (а) и соответствующая микродифракционная картина (б) стали ЭК-181 после ВТМО без отпуска с деформацией в аустенитной области  $\varepsilon \approx 30\%$

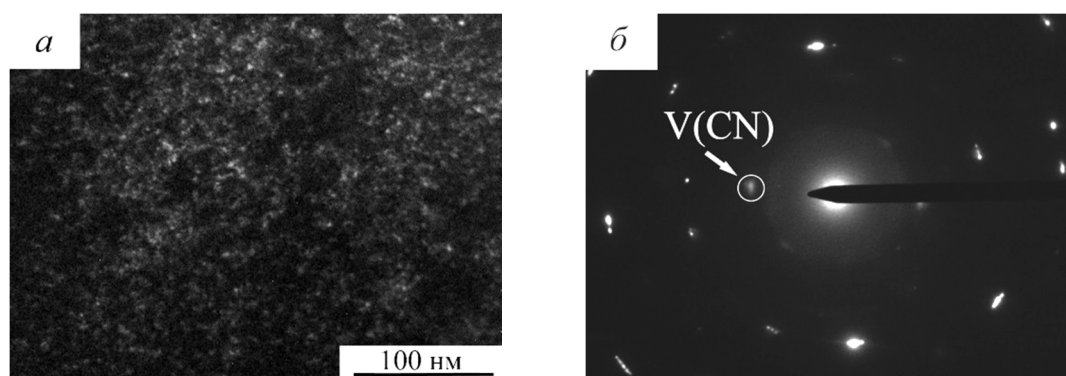


Рис. 2. Темнопольное изображение в рефлексе карбонитрида V(C, N) (а) и соответствующая микродифракционная картина (б) стали ЭК-181 после ВТМО с отпуском и деформацией в аустенитной области  $\varepsilon \approx 60\%$

Механические испытания на растяжение показали, что внесенная пластическая деформация приводит к значительному повышению прочностных свойств стали ЭК-181, по сравнению с ТТО, как при комнатной, так и при повышенной ( $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температуре испытаний (Таблица 1). Высокая степень деформации в процессе ВТМО позволяет получить максимальные (до 468 МПа) значения предела текучести стали (при  $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) после отпуска при относительном удлинении 9,2 %.

Таблица 1.

**Механические свойства стали ЭК-181**

Режим обработки	Температура испытаний			
	$T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$		$T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	Предел текучести, МПа	$\approx \delta, \%$	Предел текучести, МПа	$\approx \delta, \%$
ТТО	650–710	6,3	290–296	8,6
ВТМО $\varepsilon \approx 30\%$	1424–1486	5,5	430–435	7,0
ВТМО $\varepsilon \approx 30\%$ + отпуск 1 ч.	896–942	8,8	352–398	10,2
ВТМО $\varepsilon \approx 60\%$	1340–1466	6,2	554–767	5,5
ВТМО $\varepsilon \approx 60\%$ + отпуск 1 ч.	770–851	5	445–468	9,2

**Заключение.** Показаны возможности высокотемпературной термомеханической обработки в аустенитной области ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в повышении кратковременной высокотемпературной прочности. В процессе отпуска после ВТМО значительная плотность дефектов и выделившихся на них наноразмерных частиц сохраняется. Это приводит к повышению эффективности дисперсного и субструктурного упрочнения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Hollner S., Piozin E., Mayr P., Caës C., Tournié I., Pineau A., Fournier B. Characterization of a boron alloyed 9Cr3W3CoVNbBN steel and further improvement of its high-temperature mechanical properties by thermomechanical treatments // Journ. Nucl. Mater. – 2013. – V. 441. – P. 15–23.
2. Klueh R.L., Hashimoto N., Maziasz P.J. New nano-particle-strengthened ferritic/martensitic steels by conventional thermo-mechanical treatment // Journ. Nucl. Mater. 2007. – V. 367–370. – P. 48–53.
3. Litovchenko I. Yu., Polekhina N. A., Tyumentsev A. N., Astafurova E.G, Chernov V. M., Leontyeva–Smirnova M.V. The effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of heat-resistant ferritic–martensitic steel EK-181 // Journ. Nucl. Mater. 2014. – V. 455. – P. 48–53.